

Correlação Entre os Resultados do DCP e o Grau de Compactação Para Um Solo na Região Oeste de Curitiba - Pr - Brasil

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mail: izzo@utfpr.edu.br

Caio Vinícius Schlogel

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mail: schlogel@gmail.com

Juliana Lundgren Rose

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mail: julianarose@utfpr.edu.br

Rogério Francisco Kuster Puppi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mail: rfkpuppi@terra.com.br

Janine Nicolosi Correa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, E-mail: janine@utfpr.edu.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação do Grau de Compactação (GC) por meio do uso do Dynamic Cone Penetrometer (DCP), ou mais comumente conhecido, Penetrômetro Sul-Africano. O DCP é um equipamento que vem sendo muito estudado em vários países, principalmente por ser um ensaio rápido e de baixo custo. Existem várias correlações do resultado do ensaio DCP com o ensaio CBR (California Bearing Ratio), para fins de dimensionamento de pavimentos. Este trabalho, entretanto, foca na tentativa de determinar o grau de compactação em campo a partir da calibração do DCP em laboratório. O ensaio DCP foi feito nos corpos de prova moldados durante o ensaio de compactação Proctor normal, levando em conta a influência do teor de umidade quando da obtenção de correlações. Este trabalho também confirma a praticidade do equipamento devido o fato de ter conseguido se realizar vários ensaios DCP em campo em curto espaço de tempo. Com base nisso, conclui-se que a correlação obtida é viável, no entanto, para ser válida a correlação o teor de umidade do solo estudado deve estar próximo do teor de umidade ótimo, quando então é possível uma boa estimativa do grau de compactação do solo.

PALAVRAS-CHAVE: DCP, Penetrômetro, Grau de Compactação.

1 INTRODUÇÃO

A redução de custos em uma obra geotécnica é tida pela redução ou supressão de ensaios geotécnicos, quer sejam eles de campo ou de laboratório. Apesar de tal prática se constituir um enorme erro, este paradigma é comum em obras geotécnicas no Brasil, especialmente em obras de médio e pequeno porte. Geralmente, o alto custo dos ensaios geotécnicos e o curto tempo de execução da obra são dadas como

justificativas para que o controle de qualidade, previamente e durante à execução, não sejam realizados. No entanto, um controle tecnológico adequado pode ser feito, utilizando-se diferentes métodos já conhecidos por projetistas geotécnicos, são eles: Ensaio a Percussão (SPT), Ensaio de Cone (CPT), Ensaio Pressiômetro (PMT), Ensaio Dilatômetro (DMT) e California Bearing Ratio (CBR) e o Dynamic Cone Penetrometer (DCP). O ensaio de Penetração Dinâmica (DCP) foi

criado em 1956 na Austrália, modificado em 1969 na África do Sul, e vem sendo cada vez mais utilizado no Brasil. O DCP é muito utilizado em países Europeus e da América do Norte no âmbito de projeto rodoviários por ser fácil de utilizar, transportar, mais barato que outros métodos e mais simples. O DCP é um ensaio que permite avaliar o grau de compactação do solo, através da avaliação de sua resistência à penetração e estima, dessa maneira, o módulo de deformabilidade da camada compactada.

O Penetrômetro Sul Africano, também como é conhecido o DCP, permite uma caracterização bem definida não apenas de solos naturais, mas também de solos mais moles até camadas de solo britado. O relatório de resultados fornece uma relação da resistência à penetração pela profundidade da camada.

O objetivo deste trabalho é obter uma correlação entre o resultado do ensaio DCP e o Grau de Compactação de um solo, propondo uma metodologia para este fim, valendo-se do ensaio de compactação Proctor normal. Além disso, resultados obtidos em uma área experimental estudada serão apresentados.

2 CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (DCP)

O equipamento DCP, apresentado na Figura 1, consiste de uma haste de aço de 16 mm de diâmetro, possuindo no final da haste uma ponta cônica de aço com inclinação de 60° e 20 mm de diâmetro. O equipamento possui um martelo de 8 kg, que se desloca por uma distância de 575 mm do topo da haste até a parte inferior dela. A penetração da ponta de aço é medida por uma régua posta ao lado da haste vertical. O DCP é projetado para penetrar de 800 a 1.200 mm, segundo Kleyn e Savage (1982). Materiais localizados abaixo deste valor sofrem pouca influência por ação de carga de tráfego.

No Brasil, o Dynamic Cone Penetrometer foi estudado pelo Departamento de Estradas e Rodagens do Paraná-DER-PR (Heyn, 1986), por Rohn e Nogueira na USP de São Carlos (Escola de Engenharia de São Carlos) desde

1990. Também vem sendo desenvolvidos trabalhos por Oliveira e Vertamati (1997) no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), na Paraíba por Rodrigues e Lucena (1991) e Santana et al. (1998), em Santa Catarina por Cardoso e Trichês (1998 a 1998b, 1999, 2000) na BR- 101/SC, e em Pernambuco por Claus e Ferreira (2014). Ainda, Claus e Ferreira (2014) citam algumas características do DCP, como a vantagem de ser semi não-destrutivo e de provocar menos perturbações na na camada de solo compactada.

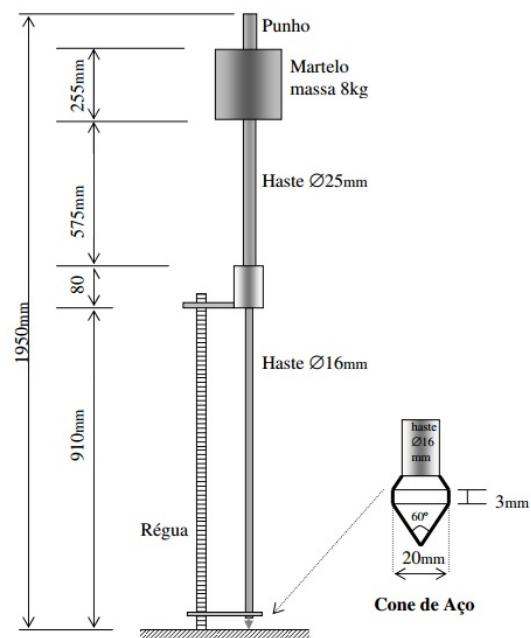


Figura 1. Equipamento DCP.

O DCP possui vantagens sobre outros ensaios, principalmente devido a sua praticidade. Segundo Selig e Water apud Berti (2005), para a realização do ensaio há necessidade de um grupo de dois ou mais operadores. Um responsável pelo manuseio e outros pelas leituras, fazendo com que a perfuração dure em média 5 min. Para a realização do DCP não há necessidade de movimentação de terra, facilitando ainda mais o ensaio e classificando-o como ensaio não destrutivo. Existem várias correlações entre o ensaio DCP o ensaio CBR para projeto e controle tecnológico de pavimentação de vias por ser um ensaio mais barato. Segundo Harrison (1986), o CBR é amplamente utilizado em projetos de pavimentos, entretanto, por ser

um método demorado e caro para ser realizado in situ pode ser substituído pelo DCP, que o substitui com precisão. Ambos os ensaios podem ser relacionados, resultando em soluções mais confiáveis. Ainda, de acordo com Zumrawi (2014), o cone de penetração dinâmica aplica-se principalmente em pavimentação e tem correlações principalmente com o CBR. Bastos (2014) ressalta que o DCP apresenta facilidade quanto à sua mobilidade - por ser leve e pequeno - possibilitando a realização de ensaios em locais de difícil acesso.

3 MÉTODOS

Descrevem-se neste item, a área na qual foram realizados os ensaios, a metodologia de pesquisa utilizada e também as normativas brasileiras que foram empregadas para obtenção de resultados.

3.1 Área Experimental

Os ensaios foram realizados na área de estacionamento do campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Curitiba - PR, a qual doravante será denominada de área de estudo. A área de estudo está localizada no extremo oeste da capital do Estado do Paraná, podendo sua localização e dimensões serem observadas na Figura 2.

Nesta área foi feito um aterro composto de três níveis, visando servir de local de estacionamento. O solo utilizado para o aterro foi obtido na própria região da obra, sendo um solo de coloração vermelha, classificado como uma areia siltosa, que compõe uma das camadas mais superficiais da Formação Guabirotuba. Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica deste solo podem ser vistos no item 4. Durante a construção do aterro, utilizou-se um rolo compactador tipo pé de carneiro, no entanto não houve controle tecnológico algum durante o processo de compactação.

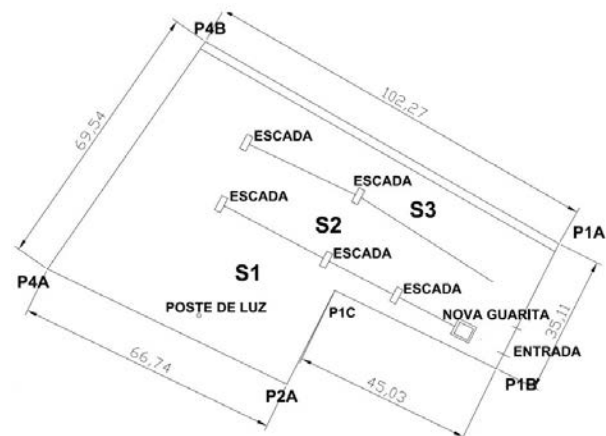


Figura 2. Localização da área experimental e dimensões da mesma.

3.2 Ensaios Laboratoriais

O estudo laboratorial teve início com a retirada de amostra de solo na área de estudo. Esta amostra foi levada ao laboratório e foram feitos os seguintes ensaios: limites de liquidez (NBR-6459 e DNER-ME 122/94) limite de plasticidade (NBR-7180 e DNER-ME 82/94), densidade real da amostra (DNER-ME 93/94), granulometria e sedimentação (NBR-7181), Ensaio de Compactação Proctor Normal (NBR-7182 e DNER-ME 162/94) em diferentes umidades e o ensaio DCP, o qual pode ser observado na Figura 3. Os resultados destes ensaios serão apresentados e discutidos no item de análise dos resultados.



Figura 3. Ensaio DCP feito juntamente com o ensaio de compactação.

Como não há normativa brasileira para o ensaio DCP, foi utilizada a norma do departamento canadense de transporte do estado de Saskatchewan (Saskatchewan Highways and Transportation, 1992), como base para realização do ensaio em laboratório e posteriormente em campo.

Com base nos resultados obtidos no Ensaio de Compactação (Proctor Normal) foi possível se obter um grau de compactação de calibração (GC_{calib}). O valor de GC_{calib} é função do resultado do ensaio DCP feito em um corpo de prova compactado com a Energia Normal, onde a massa específica seca deste corpo de prova (MEAS) foi dividida pela massa específica seca máxima ($MEAS_{max}$) obtida do Ensaio de Compactação.

$$GC_{calib} = f\left(DN, \frac{MEAS}{MEAS_{max}}\right) \quad (1)$$

A cravação com o DCP foi realizada no centro de cada corpo de prova posteriormente a realização de cada etapa do Ensaio de Compactação, e as leituras da penetração no corpo de prova foram feitas a cada golpe. O ensaio foi dado como terminado no momento em que as leituras indicavam que a ponta estava próxima do fundo do molde. Não permitiu-se que a ponta cônica alcançasse o fundo do molde

para que não houvesse dano ao DCP.

3.2 Ensaio *In Situ*

Após realização dos ensaios laboratoriais passou-se para os ensaios de campo. Foi realizado 01 ensaio de penetração a cada 10 m de distância área de estudo, que possui em torno de 5700 m². Os pontos onde foram realizados os ensaios são apresentados na Figura 4.

Durante a realização dos ensaios DCP em campo houve a necessidade de cavar buracos para retirada do material graúdo (brita) que foi depositado na parte superior da área de estudo para servir como pavimento (Figura 5). Esse material graúdo pode também danificar o aparelho e influenciar nos resultados finais.

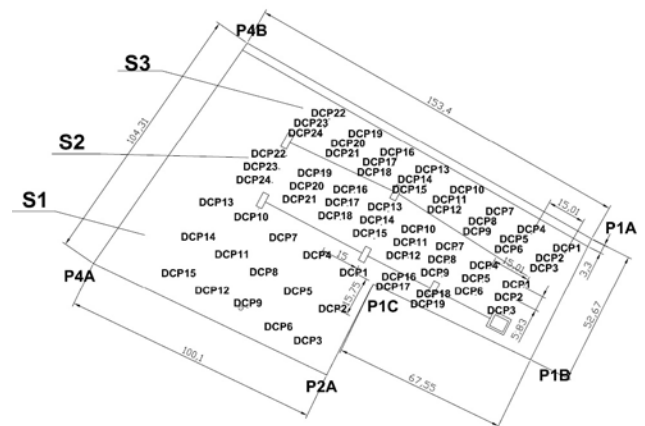


Figura 4. Localização dos pontos de ensaio DCP em relação a área experimental.



Figura 5. Ensaio DCP *in situ*.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nos ensaios realizados no laboratório e em campo, como explicado na metodologia, obtiveram-se resultados que são demonstrados a seguir.

Com base nos ensaios de caracterização do solo coletado, chega-se a conclusão de que o material é uma areia fina mal graduada siltosa (SP-SM). Essa conclusão foi obtida por meio do método de classificação unificado (USCS), e o gráfico de granulometria pode ser visto na figura 6.

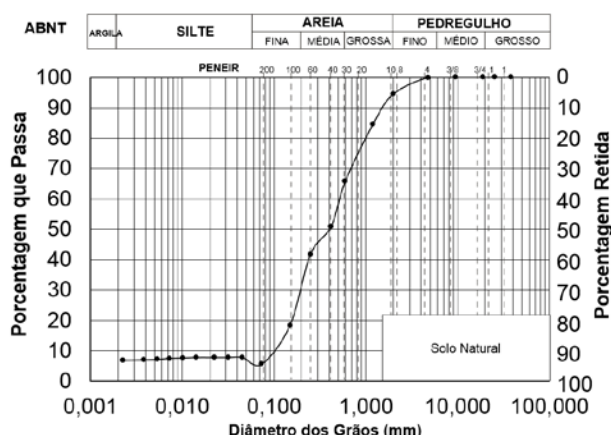


Figura 6. Curva de distribuição granulométrica.

Por meio dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade obtiveram-se os resultados demonstrados na Tabela 1. Percebe-se que há influência da fração silte no solo coletado devido aos valores relativamente altos de índice de plasticidade.

Tabela 1. Resultados dos limites de Atterberg.

ENSAIO	RESULTADO (%)
LIMITE DE LIQUIDEZ	48,94
LIMITE DE PLASTICIDADE	28,93
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	20,02

Após os ensaios de granulometria e de limites de Atterberg foram realizados os ensaios de compactação Proctor normal, em corpos de prova com diferentes umidades. O resultado obtido para este ensaio foi de 27,13% para a umidade ótima e 1,52 g/cm³ para a massa específica aparente seca. O gráfico é

demonstrado na figura 7.

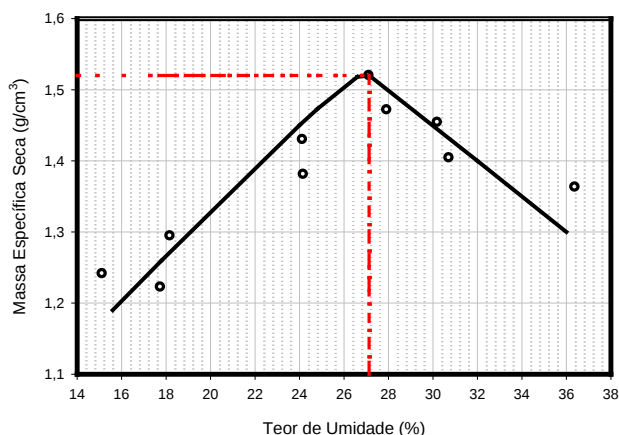


Figura 7. Curva de compactação.

Logo após a compactação, o corpo de prova foi submetido ao ensaio DCP. Dessa maneira foram obtidos diferentes valores de DN (cm/golpe) para cada diferente ponto de umidade, expostos na Tabela 2 juntamente com os valores de massa específica aparente seca e grau de compactação de calibração ([GC]_{calib}). O GC foi obtido pela divisão da massa específica aparente de cada corpo de prova pela massa específica aparente máxima ensaiada.

O corpo de prova cinco (CP5) foi moldado apresentando umidade ótima, portanto o DN apresentado por ele é denominado de DN_{ref} (DN referência), e foi obtido uma importância de 3,3cm/golpe.

Tabela 2. Resultados do ensaio Proctor Normal e do ensaio DCP realizados em laboratório.

	Ensaio 1		
	w (%)	γ (g/cm³)	DN (cm/golpe)
CP1	17,6	1,22	1,04
CP2	22,12	1,29	1,03
CP3	23,77	1,48	1,53
CP4	24,18	1,38	1,35
CP5	27,93	1,47	2,07
CP6	30,21	1,45	4,20
CP7	36,39	1,36	6,50

	Ensaio 2		
	w (%)	γ (g/cm³)	DN (cm/golpe)
CP1	15,14	1,24	1,88
CP2	18,19	1,29	0,90
CP3	24,15	1,43	1,57
CP4	27,13	1,52	3,30
CP5	30,73	1,40	8,10

Na tabela 3 são apresentados os do grau de compactação de calibração (GC_{calib}) obtidos no ensaio de compactação a energia normal. O GC foi obtido pela divisão da massa específica aparente de cada corpo de prova pela massa específica aparente máxima ensaiada.

Tabela 3. Grau de compactação.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
GC_{calib} (%)	81,66	85,16	94,09	100,00	92,38

Na Figura 8 se apresenta a variação do valor do DN em relação ao teor de umidade e em comparação a curva de compactação. Observa-se que não existe uma tendência singular de variação do DN em comparação com a curva de compactação, como por exemplo se esperaria do resultado do ensaio da Agulha de Proctor. Ocorre, que os resultados mostram um comportamento de DN no ramo seco da curva de compactação e outro comportamento de DN no ramo úmido da curva de compactação.

No presente estudo, adotou-se uma simplificação para a obtenção de uma relação entre o Grau de Compactação e o resultado do ensaio DCP (DN). Observando o gráfico de GC versus DN, na Figura 9, e os valores experimentais apresentados na Tabela 2, assumiu-se que no caso da área de estudo o teor de umidade do solo variaria de 18 a 27,5% e que uma relação entre o GC e o DN poderia ser obtida diretamente através de uma regressão linear do tipo polinomial.

Corroborando com a hipótese do teor de umidade do solo da área de estudo ter uma variação limitada, quando da execução dos ensaios DCP in situ coletou-se amostras superficiais de solo para a determinação do teor de umidade, que na média foi de 26%. Assim, ajustou uma curva do Grau de Compactação para 3 pontos da curva de compactação obtida em laboratório em relação ao DN, também obtido em laboratório, pontos estes onde o solo encontrava-se com um teor de umidade dentro do limite de 18 a 27,5%. O resultado do ajuste feito pode ser observado na Figura 10.

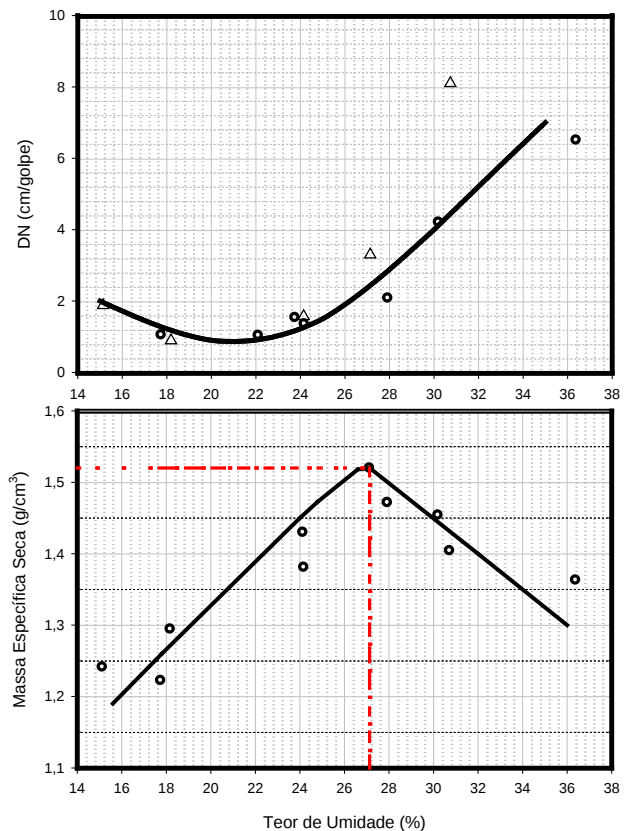


Figura 8. DN versus Teor de Umidade em comparação com a Curva de Compactação.

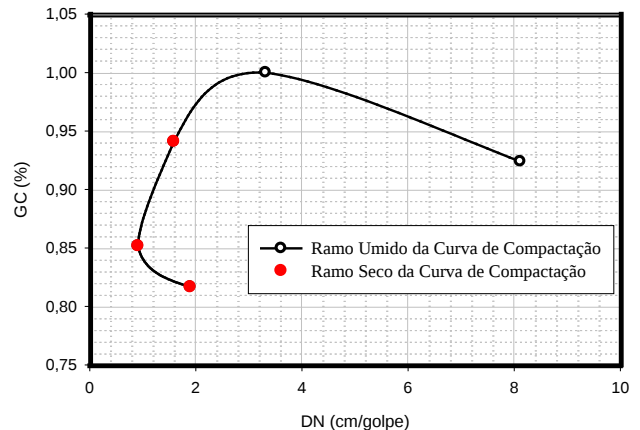


Figura 9. Curva de correlação DNxGC.

A equação obtida foi:

$$GC = 0,6758 + 0,2324 \times DN - 0,0406 \times DN^2 \quad (2)$$

Esta equação foi então empregada nos valores obtidos para DN in situ. Estes valores de DN foram alcançados realizando-se os ensaios DCP em vários pontos da área de estudo assim como apresentado na Figura 4. Os resultados obtidos para GC a partir dos resultados de DN em campo são mostrados na Tabela 4.

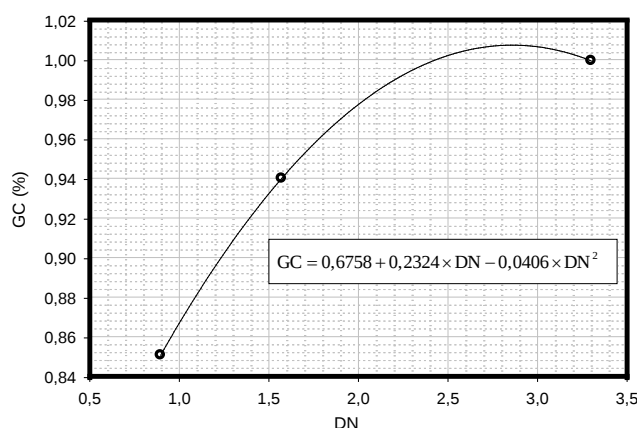


Figura10. Curva de calibração.

Tabela 4. Resultados do cálculo do Grau de Compactação utilizando a Equação 2.

Pontos	Setor 1		Setor 2		Setor 3	
	DN	GC (%)	DN	GC (%)	DN	GC (%)
1	2,07	0,953	1,67	0,928	2,49	0,975
2	2,39	0,970	1,99	0,949	2,11	0,956
3	***	0,000	2,85	0,991	***	0,000
4	1,63	0,926	1,63	0,926	2,73	0,986
5	2,04	0,952	***	0,000	***	0,000
6	2,33	0,967	2,22	0,961	***	0,000
7	1,28	0,899	1,91	0,944	***	0,000
8	2,79	0,988	1,79	0,936	1,39	0,908
9	2,27	0,964	2,32	0,966	1,07	0,880
10	1,76	0,935	1,87	0,942	***	0,000
11	0,53	0,808	1,15	0,887	1,53	0,919
12	1,18	0,890	2,24	0,962	1,65	0,927
13	2,95	0,995	1,85	0,940	***	0,000
14	1,39	0,908	0,65	0,828	0,75	0,843
15	0,56	0,814	2,02	0,950	1,52	0,918
16	1,97	0,947	***	0,000	***	0,000
17	2,06	0,953	1,22	0,894	***	0,000
18	1,65	0,927	1,89	0,943	***	0,000
19	1,72	0,932	***	0,000	***	0,000
20			1,32	0,903	***	0,000
21			1,71	0,932	***	0,000
22			***	0,000	***	0,000
23			***	0,000	***	0,000
24			1,48	0,915	***	0,000

*** valores foram eliminados da análise por estarem fora da faixa de umidade estudada, 18,19%-27,13%

Com base nos resultados obtidos para GC foi possível através de interpolação de valores,

traçar um mapa do Grau de Compactação da área de estudo utilizando a correlação obtida, o que pode ser observado na Figura 11.

No mapa do Grau de Compactação da área de estudo, as regiões representadas na cor azul escuro são as com maior Grau de Compactação e as regiões com menor Grau de Compactação são representadas pela cor verde claro.

Devido o software utilizado ser uma versão demo, muitas das funções são restritas, uma delas é impor o contorno da área de estudo, por causa desse motivo há indicação de compactação fora da delimitação da área do estacionamento.

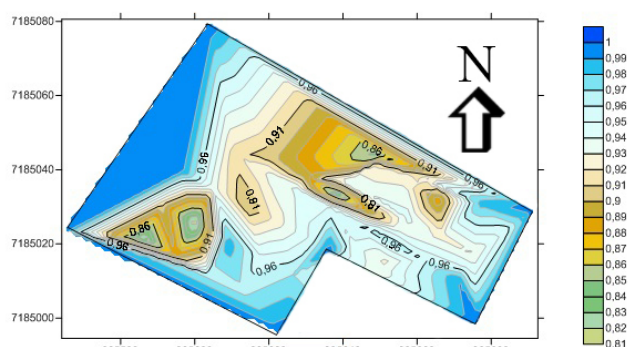


Figura11. Mapa de grau de compactação da área de estudo.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e previamente discutidos conclui-se que o DCP é um equipamento de fácil manuseio, um ensaio fácil de ser executado por duas pessoas e apresenta baixa dispersão entre os resultados. Adiciona-se a isso a alta aplicabilidade já comprovada do equipamento em substituir ensaios mais custosos e que demandam mais tempo.

O valor do DN sofre grande influência do teor de umidade do solo, apresentando grande variação tanto no ramo seco, quanto no ramo úmido, sendo mais notável no ramo úmido da curva de compactação. No entanto, quando o solo apresenta massa específica seca e teor de umidade próximos das condições ótimas de compactação, é possível obter uma correlação entre o GC e o DN. No entanto, esta correlação deve ser utilizada com parcimônia já que a obtenção de uma correlação confiável entre GC e DN, válida para o solo estudado e para

qualquer condição a que este se encontre, depende de três variáveis principais, o teor de umidade do solo, sua massa específica seca e a resistência a penetração do DCP (DN).

Com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se ter uma boa idéia acerca da qualidade de compactação do solo no aterro construído, mesmo não havendo um controle tecnológico apropriado durante a construção.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação Araucária, a CAPES e ao CNPQ pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a, 6 p.
- _____. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b.
- _____. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984c.
- _____. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. NBR 6457: Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- Bastos, N. J.; Bernardes, G. P.; Pereira, D. A. P. S. Influência da Geometria da Ponta do Penetrômetro Dinâmico Leve - DPL na Resistência à Penetração e no Atrito Mobilizado. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia (GO), set.2014.
- Berti, C. (2005) Avaliação da capacidade de suporte de solos “in situ” em obras viárias através do Cone de Penetração Dinâmica: estudo experimental, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 122 p.
- Cardoso, A. C. e Trichês G. (1998a). Utilização do penetrômetro dinâmico de cone no controle tecnológico de camadas finais de aterros rodoviários e na avaliação da sua capacidade de suporte, 31ª Reunião anual de Pavimentação, São Paulo, Vol. 2, p. 686-699.
- Cardoso, A. C. e Trichês G. (1998b). Avaliação da capacidade de suporte de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone, 11º Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, Vol. 1, p. 649-656.
- Cardoso, A. C. e Trichês G. (1999). Avaliação da capacidade de suporte de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone e a viga Benkelman, 13ª Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, São Carlos.
- Cardoso, A. C. e Trichês G. (2000). Proposição de uma metodologia para utilização do penetrômetro dinâmico de cone no controle da execução da camada final de terraplenagem, 32ª Reunião anual de pavimentação, Brasília, p. 661-673.
- Claus, R. P. e Ferreira, S. R. M. (2014). Uma proposta para se avaliar o grau de compactação e a homogeneidade da camada compactada utilizando o DPL. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2014.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 122: Determinação do limite de liquidez de solos - método da referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994a, 7 p.
- _____. ME 82: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994b.
- _____. ME 93: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994c, 4 p.
- _____. ME 162: Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994d.
- Harrison, J.A. (1986). Correlation of CBR and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils. Australian Road Research, Vol. 16, num. 2, p.130-136.
- Heyn, A.T. (1986) Aplicações de penetrômetro dinâmico de ponta cônica na avaliação de estruturas de pavimento, 21ª reunião anual de pavimentação, Salvador, p. 139-149.
- Kleyn, E.G. e Savage, P.E (1982). The Application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements, International symposium on bearing capacity of roads and airfields, Trondheim, Norway, vol. 1.
- Oliveira, L. E. e Vertamati, E. (1997). Análise de pavimentos de baixo volume de tráfego executado com solos transicionais, I SINBATRA, Rio de Janeiro.
- Rohm, S. A. e Nogueira, J. B. (1990). Determinação de mini-CBR através do ensaio de penetração dinâmica, 24ª reunião anual de pavimentação, Rio de Janeiro.
- SHT: Saskatchewan Highways and Transportation. STP 240-20: Dynamic Cone Penetrometer. Saskatchewan, Canadá, 1992, 9 p. Disponível em <<https://www.wsask.ca/Global/Water%20Info/Ground%20Water/Science%20And%20Geology%20Reports/Geology%20of%20the%20Deer%20Creek%20Bridge%20Area%200135-002.pdf>>. Acesso em 10 mai 2015.
- ZUMRAWI, M. M. E. Prediction of In-situ CBR of Subgrade Cohesive Soils from Dynamic Cone Penetrometer and Soil Properties. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, v. 6, n. 5, oct. 2014.